

Л.В. АВТОНОМОВА, канд. техн. наук, пров. наук співр., НТУ «ХПІ»

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНОГО СТАНУ ПОТУЖНОСТРУМОВОГО З'ЄДНАННЯ

Розглядаються особливості математичної моделі електротермомеханічного стану електричного з'єднання на прикладі гніздового затискача. Досліджено вплив зміни його температури на напружено-деформований стан та перехідний опір.

Рассматриваются особенности математической модели электротермомеханического состояния электрического соединения на примере гнездового зажима. Исследовано влияние изменения его температуры на напряженно-деформированное состояние и переходное сопротивление.

Electrotherm mechanical state of the electrical connector kind of F-clamp is considered. The effect of changing temperature on the stress-strain state and transient resistance is examined.

Вступ. Проблема взаємозв'язку полів різної природи займає в механіці суцільного середовища важливе місце і має велике значення при розв'язанні прикладних задач. Одним з прикладів таких задач є дослідження в галузі електричних контактів. Розв'язання проблеми оптимального вибору режимів роботи, вивчення теплофізичних процесів в електричних контактах безпосередньо пов'язано з напружено-деформованим станом, викликаним різними факторами (затягування контактів, термонапружені зусилля й інше). Тільки розв'язання зв'язаної задачі електротермомеханіки здатне прогнозувати характер зміни фізичного стану електричного контакту в процесі роботи і дати рекомендації ще на стадії проектування щодо вибору режимів експлуатації, зміни конструкції з'єднання, що дозволять поліпшити їх працездатність і збільшити термін служби.

Аналіз досліджень. Дослідження електричного, теплового та механічного станів електричного контакту з урахуванням процесів, що протікають в зоні контакту, виконуються переважно експериментально. Практично неможливо визначити розподіл температурного поля контактної системи і, тим більше, поля напружень і деформацій у процесі роботи [1]. Аналітично для скінченних тіл можна отримати тільки наближені розв'язки задач лінійної електротермопружності, основані на використанні методів осереднення та асимптотичного розкладання по малому параметру задачі [2]. В даний час, з розробкою програмних продуктів, таких як ANSYS, стало можливим отримувати чисельні розв'язки у тривимірній постановці зв'язаних задач електротермомеханіки на основі методу скінчених елементів. Враховуючи одночасно складну геометрію і різну фізичну природу взаємодії тіл доцільно об'єднати процеси знаходження невідомих та врахування різного роду нелінійностей в рамках єдиної ітераційної схеми. При використанні методу фрагментації для розв'язання зв'язаної задачі електротермопластичності необхідно розглянути

задачі для механічного, теплового та електричного контакту системи скінченних тіл. Розрахунок напружено-деформованого (н.д.с.) стану струмопровідних реальних конструкцій з урахуванням контактної взаємодії різної фізичної природи стає актуальною задачею інженерної практики.

Постановка задачі та математична модель. Метою роботи є створення математичної моделі, що описує контактну взаємодію електричних пар з'єднання, які піддаються інтенсивним електротермомеханічним впливам, і найбільш точно відображає реальні граничні умови та забезпечує зв'язаність окремих крайових задач в єдиному обчислювальному процесі.

Факторами, що впливають на роботу електричного контакту, є перехідний опір, температура зони контакту електричних пар, температура та інтенсивність теплообміну контакт-деталей, контактні зусилля, габаритні розміри. Із підвищенням температури зони контакту збільшується перехідний опір, який викликає нове підвищення температури і т.д., аж до виходу контакту із ладу [1]. Зменшення та стабільність його може бути досягнута при підвищенні рівня контактного стиснення, що збільшує ефективну площу електричного контакту, яка залежить від н.д.с. У деяких випадках при виконанні контактного з'єднання певної конфігурації, термопружні напруження сприяють збільшенню контактного стиснення, що може забезпечувати необхідний рівень перехідного опору. На прикладі чисельного дослідження електротермомеханічного стану навісного потужнострумове електричного затиску можна показати вплив його термонапруженого стану на величину контактного зусилля, стабілізацію перехідного опору і вибір діапазону параметрів для раціонального робочого режиму електричного з'єднання.

У загальному випадку система рівнянь описує нелінійні пов'язані електромагнітні, теплові і механічні поля, що виникають в електричних контактних з'єднаннях. Якщо знехтувати динамічним членами в рівняннях руху і не враховувати зв'язаність полів деформацій та температури, то отримаємо таку систему рівнянь:

- рівняння електричного поля

$$\operatorname{div}(\sigma(T, \sigma^{ij}) \operatorname{grad} \varphi) = 0, j(x_i, t) = I(t) * [-\sigma(T, \sigma^{ij}) \operatorname{grad} \varphi]; \quad (1)$$

- рівняння нестационарної теплопровідності

$$\rho c_v \partial T / \partial t = \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T + j^2(x_i, t) / \sigma(T, \sigma^{ij}); \quad (2)$$

- рівняння квазістационарної механіки твердого тіла

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} u_i) + [\operatorname{grad}(\operatorname{div} u_i)] / (1 - 2\nu) = [2\alpha_t E / (1 - 2\nu) G] * \operatorname{grad} T; \quad (3)$$

- рівняння стану (Прандтля – Рейса):

$$d\varepsilon_{ij} = [d\sigma_{ij} - \nu(3d\sigma g_{ij} - d\sigma_{ij})] / E + 3d\varepsilon_u^p(\sigma_{ij} - \sigma g_{ij}) / 2\sigma_u + \alpha_t dT g_{ij}. \quad (4)$$

У початковий момент часу t_0 задана конфігурація контактного з'єднання, напруження $\sigma_{ij}^0(x_k, 0)$, температура, термомеханічні властивості середо-

вищ (теплопровідність, опір, щільність, пружні сталі та ін.).

Граничні умови задаються в інтервалі часу $[t_0, t_1]$.

Початкові умови задаються для температури. Граничні умови для потенційної задачі струмів на поверхнях розриву:

- метал – ізолятор – $j_n = 0$; $j_t = H_0$ або $j_n^{CT} = -\sigma \text{grad}_n \varphi$;

- метал - джерело е.р.с. –

$$j_t = 0; \text{ або } \sigma_1 \partial \varphi_1 / \partial n - \sigma_2 \partial \varphi_2 / \partial n = j_{n1}^{CT} - j_{n2}^{CT}; \quad \varphi_1 = \varphi_2;$$

- метал – метал – $j_{n1} = j_{n2}$; $\sigma_1 j_{t1} = \sigma_2 j_{t2}$ або

$$\sigma_1 \partial \varphi_1 / \partial n - \sigma_2 \partial \varphi_2 / \partial n; \quad \varphi_1 = \varphi_2 \quad (\varphi_1 - \varphi_2) / R_{nep} = \sigma_1 \partial \varphi_1 / \partial n,$$

де n, t – відповідають нормальним і тангенціальним компонентам векторів електромагнітного поля, а 1, 2 – граничним умовам 1-го і 2-го середовищ, j – густина струму, R_{nep} – перехідний опір.

Поблизу зон сторонніх джерел у наближенні рівномірно розподіленого по електродній площі струму:

$$(\partial \varphi / \partial n)_S = I(k, t) / \sigma S_i(k),$$

де $S_i(k)$ – площа k -ого електрода; у наближенні еквіпотенціальності електродної площі:

$$I(k, t) = \text{const}; \quad \varphi_k = \varphi(k) = \text{const}; \quad \varphi_i = \varphi(i) = \text{const}.$$

Густина струму в однорідних областях провідника, що не містять сторонніх е.р.с., і щільність джерел Джоулевого тепловиділення:

$$J(x_i, t) = I(t) * (-\sigma \text{grad} \varphi), \quad q = j^2(x_i, t) / \sigma. \quad (5)$$

Граничні умови для рівняння теплового стану в загальному випадку є наступними:

$$T = T_0(r, t) - \text{температура};$$

$$\lambda(\partial T / \partial n) = -q(r, t) - \text{відома густина теплового потоку};$$

$$\lambda(\partial T / \partial n) = -\alpha(r, t) * [T(r, t) - T_0] - \text{відома умова теплообміну};$$

$$[T(r, t)_1 - T(r, t)_2] / R_{KT} = \lambda(\partial T / \partial n) - \text{відома умова теплообміну твердих тіл}.$$

Для рівнянь теорії упругопластичності граничні умови [3] задаються в інтервалі часу деформування тіла, при цьому на поверхні тіла, що деформується, задаються поверхневі напруження $p_{iv} - \sigma_{ik} n_k$, або переміщення $v_i - v(r, t)$, $u_i - u(r, t)$, або змішані. Для точок, що лежать на межі поділу контактуючих поверхонь, граничні умови формулюються так:

- $u_i^1 = u_i^2$ (для зони прилипання – Σ_0)

- і закон тертя Кулона $\sigma_{nt} = f * \sigma_{nn}$ (для зони ковзання – Σ_v),

де σ_{nt} – напруга тертя, σ_{nn} – нормальний тиск, f – коефіцієнт тертя в при-
 контактному шарі; а також виконується умова непроникнення тіл одне в одне:

$$(u_n^{i-1} + u_n^{i+1}) \leq 0, \quad \sigma_{nn}^i \leq 0,$$

де u_n^{i-1} , u_n^{i+1} – переміщення точок у напрямку загальної нормалі до контакт-
 ної поверхні. Межа між зонами прилипання Σ_0 і ковзання Σ_v , межа Σ_p –
 між пружною і пластичною областями попередньо невідомі.

У загальному випадку наведена система рівнянь є зв'язаною і неліній-
 ною, що впливає із залежності контактних характеристик від величин відпо-
 відних напружень на контактній поверхні у контактних граничних умовах:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) / R_{nep}(\sigma_{ij}) = \sigma_i (\nabla \varphi_i / \partial n), (T_1 - T_2) / R_{KT}(\sigma_{ij}) = \lambda_i (\partial T_i / \partial n), \quad (6)$$

де R_{nep} , R_{KT} – опір електричний, термічний. Аналіз нестационарних процесів
 спрощується, завдяки зведенню до квазістационарного типу рівнянь електро-
 магнітного поля і термопружнوپластичності.

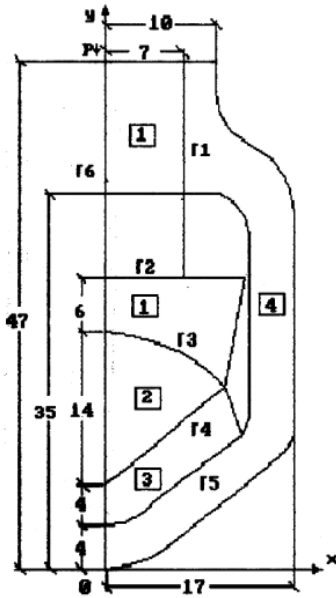


Рисунок 1 – Схема затиску

Чисельна реалізація. При проекту-
 ванні оригінальної конструкції потужност-
 румового гніздового затиску, яка дозволяє
 стабілізувати перехідний опір електричного
 контакту в режимі пропускання струму, не-
 обхідно провести аналіз його стану,
 розв'язуючи зв'язану задачу електротермо-
 пластичності з відповідними граничними та
 початковими умовами. Чисельно завдання
 розв'язувалось методом скінченних еле-
 ментів, і результати порівнювалися з даними
 тензометричних досліджень.

На рис.1 представлена схема констру-
 кції такого затиску, в якій позначено: 1 –
 латунна планка та притискний болт, 2 –
 алюмінієвий дріт, 3 – мідна клема, 4 – кор-
 пус, виготовлений із алюмінієвого сплаву,
 що має відповідні механічні і теплофізичні
 властивості. Струм (межа Г4 між дротом і
 клемою) проводиться через гніздо затиску,
 що знаходиться спочатку в напружено-
 деформованому пружному стані, що зале-
 жить від затягування болта крутним моме-

нтом М. Цей стан визначався для граничних умов, заданих у вигляді неліній-
 ного закону розподілу дотичних зусиль у різьбовому з'єднанні на межі Г1. Бі-
 чна стінка затиску при даній схемі навантаження відчуває вплив сили Р, роз-

тягується під натиском болта на планку, і згинального моменту, який створюється силою P .

При розв'язанні струмової задачі у квазістатичному наближенні вважається, що розподіл густини струму за перетином дроту рівномірний. Для задачі теплопровідності на зовнішніх межах задано конвективний теплообмін із середовищем, а на межах Г1, Г2, Г3, Г4: $\lambda \partial T / \partial n = (T - T_O) / R_{\text{кт}}$. Джоулеве виділення тепла при проходженні струму враховується при введенні теплових об'ємних джерел. За знайденим розподілом струму (1) обчислювалися щільності джерел джоулевого тепловиділення. Із розв'язку задачі термопружнопластичності (2)-(4) знайдено напружено-деформований стан (н.д.с.). Оскільки він впливає на величину контактного електричного і теплового опору, то розподіл струмів і температур в зоні електричного контакту також змінюється.

Після декількох ітерацій остаточно визначається н.д.с. контактного з'єднання, включаючи розташування зон контактування, пластичність, величину перехідного опору.

В окремих випадках можливо домогтися поліпшення параметрів електричного контакту. Наприклад, при нагріванні з'єднання, затягнутого моментом 3кГм , при проходженні струму, величини напруг стиснення, що виникають при дії згинального моменту, трохи збільшуються і перевищують напруги розтягнення від зусилля, що призводить до зростання притискового зусилля на межі Г2 та стабілізації перехідного опору.

На рис.2 представлена залежність зміни притискового зусилля від температури на межі Г2. Слід зазначити, що зі збільшенням величини номінального струму, що викликає нагрів до 50°C , відбувається зростання притискового зусилля за лінійним законом, що дає підставу стверджувати про пружний стан затиску. Далі зі збільшенням температури до 80°C відбувається його спад за нелінійним законом, що свідчить про роботу затиску у пластичній зоні. Тобто зростання величини струму призводить до поглиблення зон пластичності, а це в свою чергу, призводить до перерозподілу напружень в найбільш навантажених зонах. Чисельні результати показали, що лінійний розмір зон пластичного деформування практично пропорційний густині струму. Із нелінійного спадаючого характеру кривої випливає, що з появою пластичного деформування корпусу гніздового затиску зменшується тиск болта, а отже і зони контакту-

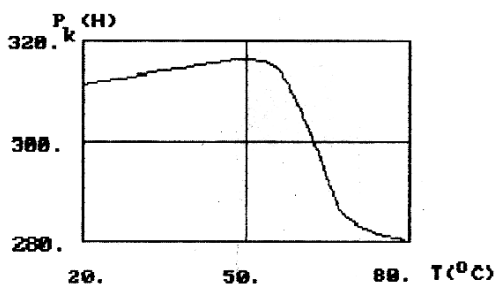


Рисунок 2 – Зміна величини притискового зусилля при нагріві затискача

на рис.2 представлена залежність зміни притискового зусилля від температури на межі Г2. Слід зазначити, що зі збільшенням величини номінального струму, що викликає нагрів до 50°C , відбувається зростання притискового зусилля за лінійним законом, що дає підставу стверджувати про пружний стан затиску. Далі зі збільшенням температури до 80°C відбувається його спад за нелінійним законом, що свідчить про роботу затиску у пластичній зоні. Тобто зростання величини струму призводить до поглиблення зон пластичності, а це в свою чергу, призводить до перерозподілу напружень в найбільш навантажених зонах. Чисельні результати показали, що лінійний розмір зон пластичного деформування практично пропорційний густині струму. Із нелінійного спадаючого характеру кривої випливає, що з появою пластичного деформування корпусу гніздового затиску зменшується тиск болта, а отже і зони контакту-

вання, що призводить до зростання перехідного опору на межі Г4, додаткового локального нагріву і порушення струмопередачі між дротом і клеюю.

На рис. 3 наведена крива залежності моменту затягування болта від температури нагріву при пропусканні струму, що характеризує роботу гніздового затиску, у зоні пружності – область 1 і у зоні пластичності – область 2. Рекомендоване поєднання величини нагріву від струму і моменту затягування затиску відповідає граничній кривій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Автор вважає перспективними подальші напрямки досліджень, пов'язані з розробками математичних моделей, алгоритмів розв'язання зв'язаних задач електротермомеханіки з урахуванням контактної взаємодії та врахуванням залежності властивостей матеріалів від величин полів. Застосування таких математичних моделей для дослідження потужнострумових електричних з'єднань надасть можливість вивчити процеси, що протікають безпосередньо в зоні електричного контакту, проводити розрахунок і вибір параметрів з урахуванням тертя на поверхнях дотику.

Отримані чисельні результати аналізу електротермомеханічного стану дозволяють дослідити вплив різних фізичних параметрів електричного гніздового затиску. Проведення таких розрахунків для електричних контактів, які зазнають вплив інтенсивних пов'язаних електротермомеханічних полів дозволяє провести вибір робочих режимів і рекомендувати експлуатаційні параметри таких з'єднань, що забезпечують необхідний термін служби при гарантованій працездатності.

Список літератури: 1. Дзекцер М.М., Вісленев Ю.С. Многоамперные контактные з'єднання // 1987. –Л. –Вища школа, 128с. 2. Кім Є.І., Омельченко В.Т., Харін С.М. Математичні моделі теплових процесів електричних контактів // 1977. – Алма-Ата. – Наука КазССР, 236 с. 3. Галин Л.А. Контактні задачі теорії пружності і в'язко пружності. // 1980. – М – Наука, 304 с.

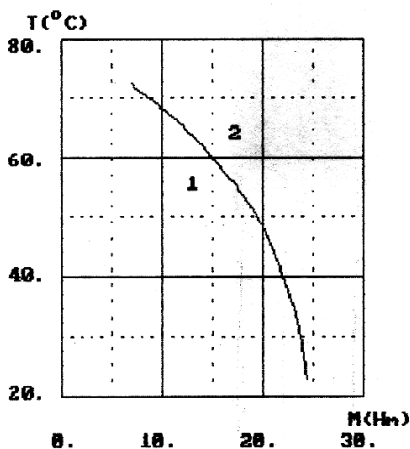


Рисунок 3 – Залежність деформації в стінці корпусу від моменту затягнення і температури затиску

Надійшла до редколегії 21.03.2011